Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19, № 2. С. 130–137. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2019. Vol. 19, no. 2, pp. 130–137. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.9:531.3 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-2-130-137

Математическое моделирование температуры в зоне контакта инструмента и изделия при токарной обработке металлов*

Е. В. Бордачев[1], В. П. Лапшин[2]**
[1] Национальный научно-исследовательский совет Канады, Оттава, Канада
[2] Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Mathematical temperature simulation in tool-to-work contact zone during metal turning***

E. V. Bordatchev[1], V. P. Lapshin[2]**
[1] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2] National Research Council Canada, Ottawa, Canada

Введение. Сопоставлены два фактора токарной обработки металлов резанием: рассеиваемая температура и мощность необратимых преобразований в материале изделия и инструмента. Статья посвящена вопросам математического моделирования их связи.
Материалы и методы. Математический аппарат основан на модификации уравнения Вольтерры, которая предполагает использование двукратного интеграла. Он показывает, как выделенная ранее при резании тепловая энергия влияет на текущее состояние температуры в зоне контакта инструмента с обрабатываемой деталью. В работе помимо предложенной новой базовой математической модели использованы результаты обработки экспериментальных данных о мощности необратимых преобразований и об измеряемой температуре в зоне контакта инструмента с деталью при токарной обработке металла. Эксперименты проводились на станке 1К625 и стенде STD.201-1. В пакете Matlab была создана специализированная программа для обработки массивов информации, описывающих процессы, протекающие при резании (силы реакции, вибрации инструмента и мощность необратимых преобразований). В этой же программе выполнен расчет температуры в зоне контакта инструмента и детали.
Результаты исследования. Проведена процедура параметрической идентификации предлагаемой базовой математической модели. Полученная модель показала высокую степень близости экспериментальных данных о состоянии температуры в зоне резания и моделируемого уровня тепловой энергии, однако на начальном участке измеряемой температурной зависимости результаты двух этих подходов не вполне согласуются. Это можно объяснить погрешностью экспериментального измерения температуры на основе оценки вырабатываемой термоэлектродвижущей силы (термоЭДС), которая формируется в результате образования естественной термопары в зоне контакта инструмента и детали.

Introduction. Two factors of metal turning are compared: the dissipated temperature and the power of irreversible transformations in the material of the product and the tool. The paper is devoted to the issues of mathematical modeling of their link.
Materials and Methods. The mathematical apparatus is based on the modification of the Volterra equation which involves the use of double integral. It shows how the thermal energy released earlier during cutting affects the current state of temperature in the tool-to-work contact zone. In addition to the proposed new basic mathematical model, the processing effect of the observed data on the power of irreversible transformations and the measured temperature in the tool-to-work contact zone under metal turning are used. The experiments were carried out on 1K625 machine and STD.201-1 stand. A specialized software tool for processing information arrays describing the processes occurring during cutting (reaction forces, tool vibrations and power of irreversible transformations) was created in the Matlab package. The same tool has performed the temperature calculation in the tool-to-work contact zone.
Research Results. The procedure of parametric identification of the proposed basic mathematical model is carried out. The resulting model showed a high degree of proximity of the experimental data on the temperature in the cutting zone and the simulated level of thermal energy; but in the initial section of the measurable temperature dependence, the results of these two approaches are in rather poor agreement. This can be explained by an error of the experimental temperature measurement based on the estimate of the thermoelectromotive force (thermal EMF) output which is generated as a result of the dynamic thermocouple formation in the tool-to-work contact zone.



* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №19-08-00022 А.
** E-mail: Lapshin1917@yandex.ru, Evgueni.Bordatchev@nrc-cnrc.gc.ca
*** The research is done with the financial support from RFFI (grant no. 19-08-00022 A).

Обсуждение и заключения. Предлагаемая математическая модель позволяет адекватно описывать процесс преобразования механической составляющей энергии резания в тепловую составляющую через показатель суммарной выделяемой мощности механического взаимодействия в зоне резания за все время обработки.

Discussion and Conclusions. The proposed mathematical model enables to adequately describe the conversion of the mechanical component of the cutting energy into the thermal component through the indicator of the total output power of the mechanical interaction in the cutting zone for all the processing time.

Ключевые слова: точение, резание, мощность необратимых преобразований, обработка металлов, теплопроводность металлов, уравнение Вольтерры, термоэлектродвижущая сила (термоЭДС).

Keywords: turning, cutting, power of irreversible transformations, metal working, thermal conductivity of metals, Volterra integral equation, thermoelectromotive force (thermal EMF).

Образец для цитирования: Бордачев, Е. Математическое моделирование температуры в зоне контакта инструмента и изделия при токарной обработке металлов / Е. Бордачев, В. П. Лапшин // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 2. — С. 130−137. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-2-130-137

For citation: E. Bordatchev, V.P. Lapshin. Mathematical temperature simulation in tool-to-work contact zone during metal turning. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 130−137. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-2-130-137

Введение. Тепловые процессы, протекающие при обработке металлов на металлорежущих станках (как в металлах, так и в других средах), являются сложноописываемыми. Их анализ основан на уравнении теплопроводности Фурье [1]. В случаях, связанных с обработкой металлов резанием, нужно иметь представление о температуре в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали [2–5]. При этом нет необходимости контролировать распространение тепла за пределами данной зоны, так как на условиях обработки это не сказывается. Аналогичные рассуждения можно применить к другому широко распространенному методу описания тепловых процессов, который учитывает формирование истоков и стоков тепла в детали [6]. Такие подходы не позволяют использовать динамику процесса резания в описании возникающих тепловых явлений в зонах контакта и создать систему уравнений, представляющих преобразование механической энергии в тепловую.

При операциях с металлами на металлорежущих станках необратимые преобразования в детали и инструменте вызывают производство тепла, которое, согласно второму закону термодинамики, рассеивается в пространстве. Тепловые процессы в металлах более инерционны, чем динамика процесса обработки, поэтому рассеивание продолжается достаточно длительное время. Само производство тепла в рассматриваемом случае связано с мощностью необратимых преобразований [11], которая зависит от величины сил реакции на формообразующие движения инструмента [2–5] в зоне контакта с деталью. При этом производство тепла является основным механизмом рассеивания выделенной энергии преобразования материалов [12].

Динамика процесса резания и вопросы ее моделирования напрямую связаны с представлением сил и реакций в координатах состояния процесса. В этом случае, как правило, учитывается только механическая составляющая, что видно из зарубежных [13–18] и отечественных работ [19–21]. Таким образом, целесообразно ввести в моделирование динамики процессов обработки металлов координаты, описывающие изменение температуры в зоне контакта инструмента и детали через учет необратимых преобразований. Такой подход позволит качественно повысить адекватность используемого математического аппарата.

Материалы и методы

Обоснование математической модели. Силы, препятствующие внедрению инструмента в материал обрабатываемой детали, имеют сложное пространственное расположение в системе координат, связанной с осями деформации инструмента. В литературе, посвященной анализу сил реакций, возникающих в зоне резания, принято разложение такой реакции на составляющие [4–6, 10, 19–21]. В рассматриваемом нами случае будут справедливы следующие соотношения между составляющими сил реакции [5]:

$$R = \sqrt{{P_x}^2 + {P_y}^2 + {P_z}^2}, \quad (1)$$

где R — общая силовая реакция со стороны процесса резания на формообразующие движения инструмента; P_x — проекция силовой реакции на ось главного вращательного движения резания в направлении подачи; P_y — проекция силовой реакции, направленная по радиусу главного вращательного движения резания в вершине резания; P_z — проекция силовой реакции на ось, совпадающую со скоростью главного движения в вершине инструмента.

Соотношения между введенными силами P_x, P_y, P_z зависят от многих факторов: геометрия резца, степень износа резца и т. д. [4]. Так, в [5] при обработке острым резцом с параметрами γ = 15°, φ = 45° и λ = 0° соотношение в среднем равно

$$P_x, P_y, P_z = (0{,}3 - 0{,}4), (0{,}4 - 0{,}5). \quad (2)$$

Аналогичные рассуждения можно провести по анализу скоростей относительного движения инструмента вдоль обрабатываемой детали и получить общую скорость такого движения:

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}. \quad (3)$$

С учетом этих рассуждений определим мощность необратимых преобразований:

$$N = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}. \quad (4)$$

Допустим, что производство тепла при резании в металлорежущих станках линейно зависит от значения мощности необратимых преобразований:

$$T_p = k_T N. \quad (5)$$

Здесь T_p — величина, описывающая приращения температуры в зоне резания (°С); k_T — коэффициент связи между мощностью необратимых преобразований в зоне резания и величиной приращения тепловой энергии в зоне контакта инструмента и детали размерностью с°С/Нм. Однако общее значение температуры в заданный момент времени и в заданной зоне контакта инструмента и детали будет определяться не только текущим значением прироста тепла. В связи с рассеиванием тепла в материале детали и инструмента следует учитывать влияние:

— мощности необратимых преобразований по всему предыдущему пути,
— времени обработки изделия.

Представим себе обработку в виде некоторого дискретного графика процесса, где $N(n)$ — текущее значение мощности необратимых преобразований; $L(n)$ текущее значение пути, пройденного инструментом при обработке; $t(n)$ — текущее значение времени обработки. Согласно (5), в каждой рассматриваемой точке дискретного графика процесса обработки будет выделено приращение тепла, пропорциональное мощности необратимых преобразований в этой точке пространства и времени. Текущее значение температуры в точке n будет определяться как приростом тепла в этой точке, так и влиянием приростов температуры, происходивших ранее на пути, пройденном инструментом (L) во время обработки (t). С увеличением времени и пройденного пути ослабевает влияние этих факторов на процесс выработки тепла в рассматриваемой зоне контакта, поэтому для математического описания удобен подход, основанный на использовании оператора Вольтерры второго рода [10]. Его невозможно применить напрямую из-за сложности описания распространения тепла в металлах, поэтому в качестве базовой модели примем мультипликативный критерий оценки влияния предыдущего прироста тепла на текущее значение в виде двойного интеграла:

$$T_z = \Theta_s + k_T \iint_D w_L(\gamma - L) w_t(\eta - t) N(\gamma, \eta) d\gamma d\eta. \quad (6)$$

Здесь T_z — значение тепла в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали; Θ_s — температура окружающей среды; $w_L(\gamma - L)$ — ядро оператора, характеризующее влияние выделенной ранее мощности необратимых преобразований по пути обработки на текущее значение температуры; $w_t(\eta - t)$ — ядро оператора, характеризующее влияние выделенной ранее мощности необратимых преобразований по времени обработки на текущее значение температуры; D — область интегрирования, характеризующая пространственно-временное рассеивание тепла; γ имеет размерность расстояния, м; η — имеет размерность времени процесса обработки, с. Сами ядра интегрального оператора представляют собой безразмерные коэффициенты усиления.

Интегральный оператор, представленный в виде двойного интеграла (6), можно свести к кратному интегралу следующего вида:

$$T_z = \Theta_s + k_T \int_0^{L(t)} w_L(\gamma - L)\, d\gamma \int_0^t w_t(\eta - t) N(\eta) d\eta. \quad (7)$$

Пройденный инструментом путь является функцией времени, т. к. каждому значению времени можно поставить в соответствие значение пройденного пути. Следовательно, подход (7) справедлив.

В качестве ядер предложенного в (7) интегрального оператора удобно использовать экспоненциальные функции следующего вида [10]:

$$\begin{cases} w_L(\gamma - L) = e^{\alpha_1(\gamma - L)} \\ w_t(\eta - t) = e^{\alpha_2(\eta - t)} \end{cases}, \quad (8)$$

где α_1, α_2 — масштабирующие параметры интегрального оператора, подлежащие идентификации.

Таким образом, предложенный в (7) интегральный оператор примет следующий вид:

$$T_z = \Theta_s + k_T \int_0^{L(t)} e^{\alpha_1(\gamma - L)} d\gamma \int_0^t e^{\alpha_2(\eta - t)} N(\eta) d\eta . \qquad (9)$$

Этот оператор имеет решение для стационарного случая, когда мощность необратимых преобразований является постоянной величиной $N_0 = N(t)$.

$$T_z = \Theta_s + \frac{k_T N_0}{\alpha_1 \alpha_2}(1 - e^{-\alpha_1 L})(1 - e^{-\alpha_2 t}) . \qquad (10)$$

Как видно из (10), при стационарном процессе обработки температура в зоне резания экспоненциально нарастает с начального значения Θ_s до некоторого конечного значения, равного:

$$T_z = \Theta_s + \frac{k_T N_0}{\alpha_1 \alpha_2} . \qquad (11)$$

Проиллюстрируем эти рассуждения, задав $\Theta_s = 25$ °C; $k_T = 0{,}0026$ с°C/Нм; $\alpha_1 = 0{,}03$; $\alpha_2 = 0{,}01$; $N_0 = 20$ Нм/с (рис. 1).

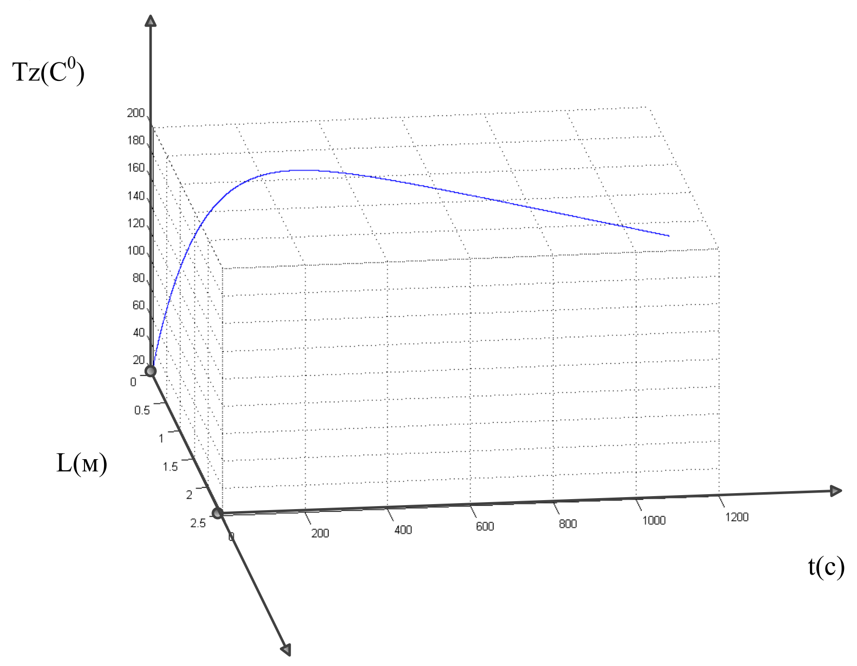


Рис. 1. Реализация процесса стационарного нарастания температуры в зоне резания

Как видно из рис. 1, стационарный тепловой процесс в зоне резания нарастает экспоненциально и, достигнув некоторого равновесного состояния, больше не изменяется. Реальные процессы, протекающие в металлорежущих станках, не являются стационарными [11–12]. Исходя из этих соображений, процесс, представленный на рис. 1, можно рассматривать как движение, к которому в устойчивом случае стремится температура зоны контакта инструмента и детали. При этом уравнение (10) является порождающим уравнением для интегрального оператора (9).

Результаты исследования

Параметрическая идентификация модели по экспериментальным данным и итоги моделирования. Для параметрической идентификации модели проведен натурный эксперимент на токарном станке 1К625 с установленным стендом STD.201-1. Стенд предназначен для изучения динамических и тепловых процессов, протекающих при резании металлов на токарных станках в различных режимах.

Основной целью эксперимента было исследование влияния динамики резания на тепловые процессы в зоне контакта инструмента и детали. Под изменением динамики резания понимается взаимное влияние износа инструмента и процесса резания, связанное с возникающей в зоне резания силовой реакцией. Измерение этой реакции и температуры через термоэлектродвижущую силу (термоЭДС), формируемую в зоне контакта инструмента и детали, позволяет оценить влияние динамики резания на тепловые процессы в указанной зоне.

Во время эксперимента выполнялось непрерывное точение детали типа вал. При этом сохранялись все параметры обработки и осуществлялся контроль изменения силовой реакции со стороны процесса резания. Условия и основные результаты эксперимента подробно описаны в [22].

Данные, полученные в результате натурного эксперимента, носят дискретный характер, следовательно, к ним нельзя напрямую применить модель, представленную интегральным оператором (9). По этой причине приходится видоизменить базовую математическую модель, описывающую динамку тепловых процессов в контакте инструмента и детали. Для начала оставим в рассуждениях только член интегрального оператора, зависящий от мощности необратимых преобразований:

$$T_z{}^N = k_T \int_0^{L(t)} e^{\alpha_1(\gamma - L)} d\gamma \int_0^t e^{\alpha_2(\eta - t)} N(\eta) d\eta \,. \tag{12}$$

Так как эксперимент уже проведен, то время его окончания t_k и соответствующее этому времени значение пути $L(t_k)$ являются постоянными величинами. Следовательно, будет справедливо вынести экспоненты с этими значениями за пределы интегралов:

$$T_z{}^N = k_T e^{-\alpha_1 L(t_k)} e^{-\alpha_1 t_k} \int_0^{L(t_k)} e^{\alpha_1 \gamma} d\gamma \int_0^{t_k} e^{\alpha_2 \eta} N(\eta) d\eta \,. \tag{13}$$

Примем, что существует некоторое дискретное множество расчетных значений мощности необратимых преобразований, полученных в результате анализа дискретной экспериментальной информации о динамике процесса резания, то есть $N(t) = N_1, N_2, N_3, N_4$......... Исходя из этого, интегральный оператор (13) примет вид следующей суммы:

$$\begin{gathered} T_z{}^N = k_T e^{-\alpha_1 L(t_k)} e^{-\alpha_1 t_k} [N_1 \int_0^{L_1} e^{\alpha_1 \gamma} d\gamma \int_0^{t_1} e^{\alpha_2 \eta} d\eta + N_2 \int_{L_1}^{L_2} e^{\alpha_1 \gamma} d\gamma \int_{t_1}^{t_2} e^{\alpha_2 \eta} d\eta + \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow + N_3 \int_{L_2}^{L_3} e^{\alpha_1 \gamma} d\gamma \int_{t_2}^{t_3} e^{\alpha_2 \eta} d\eta + N_4 \int_{L_3}^{L_4} e^{\alpha_1 \gamma} d\gamma \int_{t_3}^{t_4} e^{\alpha_2 \eta} d\eta + ...] \end{gathered} \,. \tag{14}$$

Сделав допущение $N_1 = 0$, получим окончательное решение для случая, описываемого выражением (14):

$$\begin{gathered} T_z{}^N = \frac{k_T e^{-\alpha_1 L(t_k)} e^{-\alpha_1 t_k}}{\alpha_1 \alpha_2} [N_2 (e^{\alpha_1 L(t_2)} - e^{\alpha_1 L(t_1)})(e^{\alpha_2 t_2} - e^{\alpha_2 t_1}) + \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow + N_3 (e^{\alpha_1 L(t_3)} - e^{\alpha_1 L(t_2)})(e^{\alpha_2 t_3} - e^{\alpha_2 t_2}) + ...] \end{gathered} \,. \tag{15}$$

Выражение (15) очень удобно для обработки больших массивов дискретной информации о процессе резания. Фактически речь идет о взвешенной относительно конечного значения сумме мощностей необратимых преобразований.

Рассмотрим только один эксперимент из серии, при котором износ по задней поверхности инструмента отсутствовал. В следующих случаях менялась изношенность инструмента, а значит, и динамика процесса (как с механической, так и с термодинамической точки зрения). Отметим, что полученные в этом эксперименте результаты обобщаются для всех остальных случаев, однако объем статьи не позволяет их рассмотреть.

Реакция со стороны процесса на формообразующие движения инструмента вдоль оси *x* представлена на рис. 2.

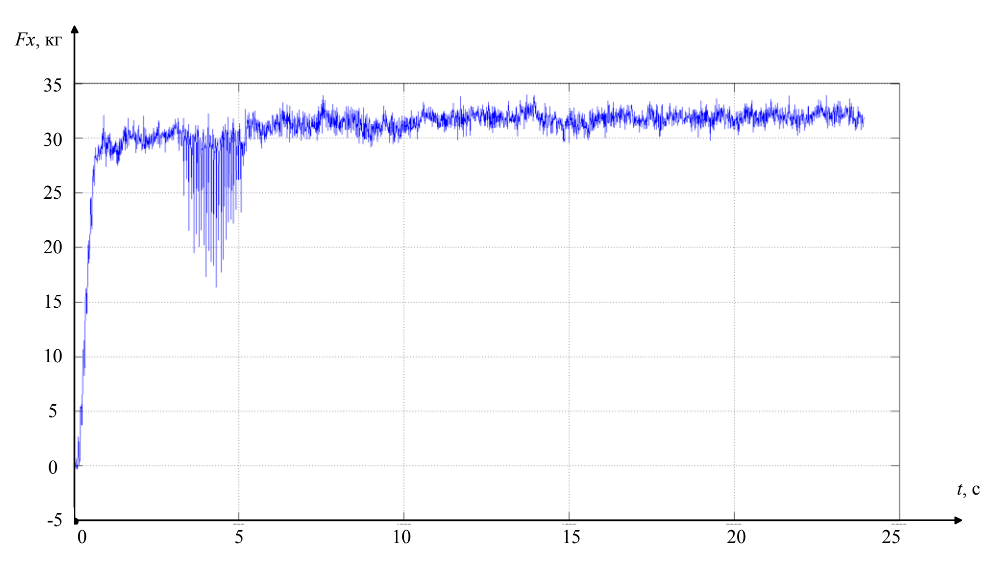


Рис. 2. Реакция со стороны процесса на формообразующие движения инструмента вдоль оси *x* на первом шаге эксперимента

Как видно из рис. 2, реакция на формообразующие движения инструмента при токарной обработке носит существенно нестационарный характер, но при этом наблюдается определенное притягивающее многообразие, вокруг которого и происходит возмущенное движение инструмента. Аналогично представленному на рис. 2 случаю в эксперименте получены реакции на формообразующие движения инструмента вдоль остальных осей. Кроме того, доступна информация об ускорениях инструмента относительно обрабатываемого изделия. Интегрирование этих данных с учетом известных элементов резания позволило получить значения скоростей обработки и пути, пройденного инструментом вдоль обрабатываемой детали.

В пакете Matlab была создана специализированная программа для обработки массивов информации, описывающих процессы, протекающие при резании (силы реакции, вибрации инструмента и мощность необратимых преобразований). В этой же программе выполнен расчет температуры в зоне контакта инструмента и детали по (15). Параметры модели представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры идентифицированной модели

α_1	α_2	k_T $^{\circ}$C/Нм	Θ_s $^{\circ}$C
0,00099	0,00078	0,000159	24,8

На рис. 3 представлены результаты моделирования выражения (15) с учетом параметров табл. 1, а также экспериментально измеренная характеристика.

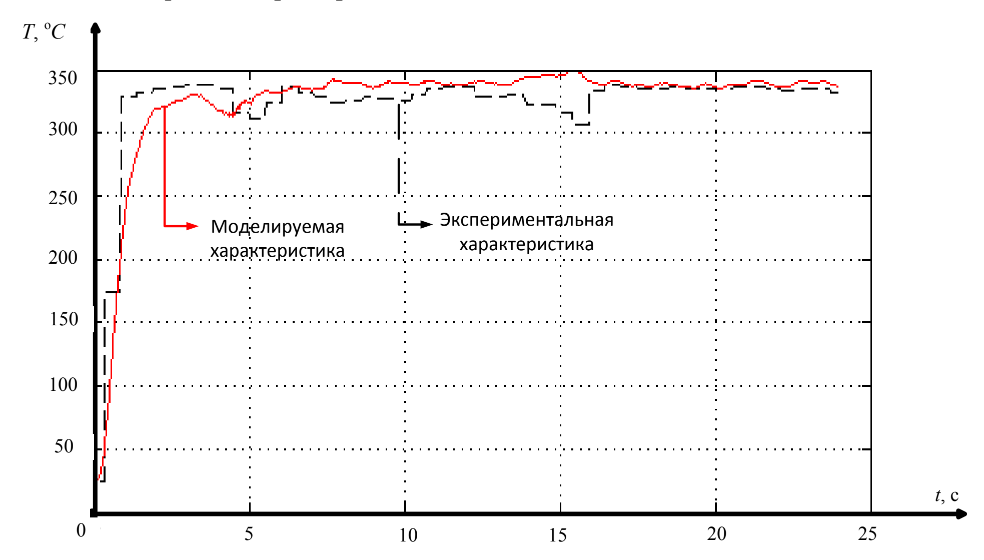


Рис. 3. Сравнение результатов, полученных в эксперименте и рассчитанных по модели

Сопоставление рис. 3 и рис. 2 показывает, что измеренное значение температуры при врезании инструмента в деталь увеличивается с 25 $^{\circ}$C (температура окружающей среды) до 330–340 $^{\circ}$C. Согласно данным рис. 3, сначала наблюдается более быстрый рост измеряемого значения термоЭДС, а в конце процесса термоЭДС стабилизируется. Это объясняется тем, что на стенде STD.201-1 измеряется не сама температура в зоне контакта, а термоЭДС естественной термопары, образуемой в контакте инструмента и детали. В начале эксперимента из-за резкого скачка температурных градиентов термоЭДС показывает слишком большой и быстрый рост температуры, а затем, по мере расхождения температурных градиентов стабилизируется. Этот эффект широко известен. Например, в [5] сказано: «Метод естественной термопары ненадежен, так как температура резания стабилизируется в течение 2–3 с».

С точки зрения динамики, изменение температуры (рис. 3), полученное в результате моделирования выражения (15), близко к процессам, протекающим при резании (рис. 2). На графике виден продолжающийся рост температуры, обусловленный продолжающимся ростом сил реакции (рис. 2). Также график отражает все динамические особенности процесса, в том числе малоамплитудные скачки сил. Из этого можно сделать следующий вывод: предлагаемая модель более точно описывает изменения температуры резания, чем данные естественной термопары. Также из рис. 3 ясно, что моделируемая характеристика, описывающая изменение температуры в зоне резания, в целом качественно совпадает с экспериментальной зависимостью. Экспериментальная и моделируемая характеристики наиболее полно совпадают после стабилизации процесса резания, в пределах 15–24 секунд.

Обсуждение и заключения. Итоги исследования дают ответ на вопрос, каким образом можно добиться адекватного экспериментальным данным описания наследственного характера передачи и накопления тепла в процессе обработки металлов точением. С этой целью необходимо смоделировать температуру в зоне контакта инструмента и детали на основании предложенного модифицированного оператора Вольтерры.

С научной точки зрения, наибольший интерес представляет предлагаемая базовая математическая модель и результаты ее идентификации на основе эксперимента по реальной обработке металлов. Здесь наблюдается высокая степень совпадения моделируемых значений тепловой энергии в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали в период установившегося процесса обработки.

Библиографический список

1. Резников, А. Н. Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. — Москва : Машиностроение, 1990. — С. 187–190.

2. Лоладзе, Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. — Москва : Машиностроение, 1982. — 320 с.

3. Макаров, А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. — Москва : Машиностроение, 1976. — 178 с.

4. Вульф, А. М. Резание металлов / А. М. Вульф. — Ленинград : Машиностроение, 1973. — 496 с.

5. Рыжкин, А. А. Обработка материалов резанием / А. А. Рыжкин, К. Г. Шучев, М. М. Климов. — Ростов-на-Дону : Феникс, 2008. — 411 с.

6. Заковоротный, В. Л. Влияние производства тепла на динамику процесса резания / В. Л. Заковоротный, И. А. Винокурова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 3 (90). — С. 14–26.

7. Вольтерра, В. Теория функционалов, интегральных и интегро-дифференциальных уравнений / В. Вольтерра. — Москва : Наука, 1982. — 304 с.

8. Работнов, Ю. Н. Элементы наследственной механики твердых тел / Ю. Н. Работнов. — Москва : Наука, 1977. — 284 с.

9. Смирнов, В. И. Курс высшей математики. Т. 2. / В. И. Смирнов. — Москва : Наука, 1974. — 479 с.

10. Заковоротный, В. Л. Моделирование износа по работе и мощности необратимых преобразований энергии / В. Л. Заковоротный, В. П. Лапшин, Т. С. Бабенко // СТИН. — 2018. — № 3. — С. 9–10.

11. Якубов, Ф. Я. К термодинамике упрочнения и изнашивания режущего инструмента / Ф. Я. Якубов, В. А. Ким, С. М. Тимофеев // Резание и инструмент в технологических системах. — 1996. — Вып. 50. — С. 211–216.

12. Якубов, Ф. Я. Синергетика и процессы самоорганизации при трении и изнашивании / Ф. Я. Якубов // Современные технологии в машиностроении : сб. науч. тр. —2010. — № 5. — С. 122–133.

13. Zakovorotny, V. L. Assessing the Regenerative Effect Impact on the Dynamics of De-formation Movements of the Tool during Turning / V. L. Zakovorotny, V. P. Lapshin, T. S. Babenko // Procedia Engineering. — 2017. — Т. 206. — P. 68–73.

14. Lapshin, V. P. Dynamic influence of the spindle servo drive on the drilling of deep narrow holes / V. P. Lapshin, I. A. Turkin // Russian Engineering Research. — 2015. — 35 (10). — P. 795–797.

15. Yildiz, A. R. A comparative study of population-based optimization algorithms for turning operations / A. R. Yildiz // Information Sciences. — 2012. — Т. 210, № 1. — С. 81–88.

16. Faga, M. G. Microstructural and mechanical characteristics of recycled hard metals for cutting tools / M. G. Faga, R. Mattioda, L. Settineri // CIRP Annals-Manufacturing Technology. — 2010. — Т. 59, № 1. — P. 133–136.

17. Hu, J. Characterizations of cutting tool flank wear-land contact / J. Hu, Y. K. Chou // Wear. — 2007. — Т. 263, № 7. — P. 1454–1458.

18. Igolkin, A. A. Method development of the vibroacoustic characteristics calculation of the gas distribution stations elements / A. A. Igolkin, L. F. Musaakhunova, K. Y. Shabanov // Procedia Engineering. — 2015. — Т. 106. — P. 309–315.

19. Лапшин, В. П. Влияние свойств сервопривода шпинделя на динамику сверления глубоких отверстий малого диаметра / В. П. Лапшин, И. А. Туркин // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2013. — № 5/6 (74). — С. 125–130.

20. Заковоротный, В. Л. Влияние параметров серводвигателей на динамические свойства системы сверления глубоких отверстий спиральными сверлами / В. Л. Заковоротный, И. А. Туркин, В. П. Лапшин // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2014. — Т. 14, № 2 (77). — С. 56–65.

21. Лапшин, В. П. Моделирование динамики формообразующих движений при сверлении глубоких отверстий малого диаметра / В. П. Лапшин, И. А. Туркин // Вестник Адыг. гос. ун-та. — 2012. — № 4 (110). — С. 226–233. — (Естественно-математические и технические науки).

22. Лапшин, В. П. Эффективность применения высокоточного измерительного оборудования для оценки качества выпускаемой продукции / В. П. Лапшин, Т. С. Бабенко, И. А. Саныгин // Инновации и инжиниринг в формировании инвестиционной привлекательности региона : сб. тр. — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2017. — С. 425–431.

Сдана в редакцию 22.01.2019
Принята к публикации 12.04.2019

Об авторах:

Бордачев Евгений Валентинович,
профессор Национального исследовательского центра Канады (ON K1K 2E1, Канада, Оттава, Монреаль-роуд, 1200), доктор технических наук, профессор,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2347-6338
Evgueni.Bordatchev@nrc-cnrc.gc.ca

Лапшин Виктор Петрович,
доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5114-0316
lapshin1917@yandex.ru